CENTRE
DE RECHERCHE
SUR LES TRANSPORTS
(CRT)
CENTRE
FOR RESEARCH
ON TRANSPORTATION

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES COMMERCIALES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE

C.P. 6128, SUCCURSALE A
MONTRÉAL (QUÉBEC)
CANADA
H3C 3J7

TÉLÉPHONE : (514) 343-7575
TÉLEX : 05-24146 BIBPOLYTEC
TÉLÉCOPIEUR (FAX) : (514) 343-7121

CRT-629

UNE NOUVELLE APPROCHE POUR LA PLANIFICATION DE L'ENTRETIEN ET DE LA RÉHABILITATION DES RÉSEAUX ROUTIERS

par

Michel Gendreau
et
Louis-Philippe Duclos

Université de Montréal
Centre de recherche sur les transports - Publication #629
Mai 1989

Dépôt légal - 2e trimestre 1989

RÉSUMÉ

Pour rationnaliser leurs activités de planification, plusieurs organismes responsables de l'administration de grands réseaux routiers ont eu recours au cours des dernières années à des systèmes de gestion des chaussées construits autour de modèles d'optimisation. La tendance générale dans ces systèmes a été de fournir aux planificateurs un modèle "étroit" complètement spécifié en termes d'objectif et de contraintes. Lorsque l'on considère la complexité des facteurs à prendre en compte en gestion des chaussées, il faut conclure que cette approche à modèle unique ne peut satisfaire aux besoins des décideurs. Pour corriger cette situation, nous proposons une approche différente dans laquelle on met à la disposition des planificateurs un outil d'aide à la décision flexible dans lequel ceux-ci peuvent spécifier eux-mêmes les problèmes d'optimisation qui leur paraissent intéressants dans le cadre du processus de prise de décision.

Mots-clés : gestion des chaussées; planification; aide à la décision; optimisation; modèles mathématiques.

- - - - - - -

ABSTRACT

To improve their planning mechanisms, many agencies responsible for the management of large highway and road networks have resorted recently to pavement management systems built around optimization models. The general tendency in these systems has been to provide planners with a single well-defined optimization model, i.e., with a model in which the objective function and the constraints have been stated once and for all. When the complexity of the issues involved in pavement management is considered, one is forced to conclude that this single model approach falls short of fulfilling the needs of decision makers. To remedy this situation, we propose a different approach: provide planners with a flexible decision-support tool which lets them specify themselves the optimization problems which seem meaningful within the scope of the decision-making process.

Key words : pavement management; planning; decision-support; optimization; mathematical models.

INTRODUCTION

Depuis quelques années, le vieillissement et la détérioration plus ou moins rapides des réseaux routiers existants ont amené les organismes responsables de ces réseaux à accorder une importance sans cesse croissante aux questions relatives à la conservation des infrastructures routières. Faisant face à un contexte budgétaire souvent peu favorable et considérant l'ampleur des coûts d'entretien et de réhabilitation dans le domaine routier, plusieurs de ces agences ont cherché à rationnaliser leurs activités de planification et de gestion afin de tirer le meilleur parti possible des ressources financières mise à leur disposition. Pour ce faire, elles ont développé (ou fait développer) des systèmes informatisés de gestion des chaussées (en anglais, "Pavement Management Systems" ou PMS). Parmi ces systèmes qu'on retrouve maintenant à travers le monde [6, 10], plusieurs sont "construits" autour de modèles d'optimisation mathématique qui sont utilisés pour déterminer les interventions d'entretien et de réhabilitation à effectuer; c'est le cas, entre autres, des systèmes des départements des transports des états d'Arizona [4, 14], de Floride [11] et du Texas [1] aux États-Unis, des ministères des transports des provinces d'Ontario [3] et du Manitoba [8] au Canada, du Danemark [13] et de Finlande [12], ainsi que de la Banque Mondiale [9]. Bien qu'ils soient plus complexes à mettre en oeuvre que les méthodes traditionnelles de planification, il est généralement admis que les modèles d'optimisation produisent des plans d'intervention plus efficients [5] et donc qu'ils représentent un pas en avant dans la recherche d'une meilleure allocation des ressources disponibles.

Ceci dit, il apparaît néanmoins que les systèmes actuels souffrent de certains limitations, notamment sur le plan de la flexibilité en tant qu'outils d'aide à la décision pour les planificateurs. Dans cet article, nous présentons une nouvelle approche pour la planification de l'entretien

et de la réhabilitation des chaussées dans les réseaux routiers de grande taille. Cette nouvelle approche se situe dans le prolongement de certaines approches antérieures, dans le sens qu'elle fait aussi appel à des techniques d'optimisation mathématique, mais elle tente de dépasser les limitations de celles-ci en créant un environnement informatique puissant pour aider l'usager dans le procœssus d'analyse et d'évaluation menant à une prise de décision éclairée.

1. PROBLÉMATIQUE

1.1 Planification stratégique et planification tactique

De manière générale, la planification de l'entretien et de la réhabilitation d'un réseau routier consiste ultimement à déterminer le lieu, le moment et la nature exacte des interventions à effectuer sur ce réseau à l'intérieur d'un certain horizon de planification (normalement, quelques années). Cependant, comme le font remarquer Kher et Cook [3] et Gendreau [2], il existe en pratique plusieurs **niveaux de planification** qui correspondent à des préoccupations différentes et parfois divergentes, et ce, surtout dans le cas des grands réseaux avec une structure administrative complexe. Cet état de fait suggère une séparation (ou "décomposition") du problème général de planification en deux problèmes :

- un **problème de planification stratégique** (ou planification proprement dite) dans lequel on tente de déterminer pour le réseau considéré dans son ensemble une stratégie globale d'intervention (budgets, objectifs de performance, priorités, etc.);
- un **problème de planification tactique** (ou programmation) dans lequel on cherche à établir pour chaque unité administrative (région ou district) considérée isolément un programme d'intervention précis pour l'année à venir en tenant compte des budgets et objectifs de performance fixés au niveau stratégique.

Mis à part des avantages certains sur le plan organisationnel, cette séparation permet de contourner les difficultés liées à la résolution numérique du problème, puisqu'elle rend possible, pour la planification stratégique, l'utilisation d'un **modèle d'optimisation agrégé**, c'est-à-dire un modèle dans lequel on regroupe les sections de routes pour fins d'étude, par opposition à un modèle désagrégé dans lequel on associerait à chaque section de route une ou plusieurs variables de décision, et qui serait donc d'une taille considérable (voir [2] pour une discussion plus détaillée sur ce sujet).

Pour régler les questions d'interface entre les deux niveaux de planification, il suffit de tenir compte de la structure administrative dans l'agrégation qui est utilisée dans le modèle de planification tactique, comme nous le verrons dans la prochaine section.

Dans la suite de cet article, notre propos portera essentiellement sur la planification stratégique (sans oublier cependant que celle-ci s'inscrit dans un cadre plus large).

1.2 L'aide à la décision

Peu importe le domaine auquel ils s'appliquent, les modèles mathématiques et les logiciels informatiques qui les implantent constituent d'abord et avant tout des **outils d'aide à la décision.** Leur rôle n'est donc pas de se substituer aux décideurs, mais plutôt de leur fournir les éléments d'information nécessaires à une prise de décision éclairée.

Il est remarquable de constater que les modèles d'optimisation qu'on retrouve dans les systèmes de gestion des chaussées existants se présentent comme des modèles "étroits" complètement spécifiés en termes d'objectif et de contraintes. Suite à des rencontres et discussions avec des fonctionnaires du Ministère des Transports de la province de Québec au Canada, il nous est apparu qu'à cause de la complexité des facteurs à prendre en

compte, ces modèles ne répondaient pas complètement aux besoins et aux attentes des usagers. Ceci nous a amené à élargir le concept de modèle de planification pour en faire un environnement flexible dans lequel un planificateur, même peu familier avec la programmation mathématique, peut formuler assez simplement des "problèmes" (ou "scénarios") dont il désire étudier et analyser la solution.

Plus précisément, nous avons défini un "méta-modèle" d'aide à la décision qui se compose de deux éléments fondamentaux : un **modèle général d'optimisation** et un **cadre descriptif formel** pour les problèmes de gestion des chaussées. Le modèle général d'optimisation constitue en quelque sorte pour le planificateur une trame qu'il peut ensuite étoffer en utilisant le cadre descriptif formel pour aboutir à des problèmes d'optimisation spécifiques.

Nous décrivons dans les sections qui suivent ces deux éléments du méta-modèle.

2. LE MODÈLE GÉNÉRAL D'OPTIMISATION

Comme nous l'avons indiqué dans la section précédente, l'intérêt de la séparation "planification stratégique/planification tactique" réside en bonne part dans le fait qu'il devient alors possible d'utiliser un modèle agrégé pour la planification stratégique. Depuis quelques années, plusieurs modèles d'optimisation agrégés ont été proposés pour la gestion des chaussées. Ces modèles sont presque tous inspirés du modèle de **processus de décision markovien** (PDM) du "Network Optmization System" de l'état d'Arizona [4, 14]. Ils reposent sur une description du réseau routier à étudier dans laquelle on regroupe à chaque instant les sections présentant des caractéristiques similaires (on dit que ces sections sont dans le même **état**), et sur l'hypothèse d'une évolution probabiliste "sans mémoire" de l'état des chaussées dans le temps, en présence ou en l'absence

d'interventions d'entretien ou de réhabilitation. Précisons ici que, par évolution "sans mémoire", on entend simplement qu'à un instant donné, l'évolution future d'une chaussée dépend uniquement de son état actuel (il faut cependant noter que l'on peut définir les états de manière très flexible et donc leur intégrer certaines informations en regard avec le passé - comme par exemple l'âge des sections).

Les modèles de processus de décision markoviens constituent une famille de modèles d'optimisation dynamique fort riche avec des propriétés très intéressantes. Nous mentionnons ici quelques-unes de celles-ci et nous renvoyons le lecteur désireux d'en connaître plus à ce sujet à l'excellent article de revue de White et White [15].

1) Il existe deux grandes sous-familles dans les modèles de PDM : les modèles en **horizon fini** qui permettent d'optimiser à moyen terme les décisions relatives à un système, et les modèles en **horizon infini** qui servent à déterminer des politiques d'intervention optimales à très long terme. Il est possible dans le cadre d'une étude donnée d'utiliser de façon complémentaire un modèle en horizon infini et un modèle en horizon fini : on résoud dans un premier temps le modèle en horizon infini pour établir un **état-cible** optimal pour le réseau; cet état-cible est par la suite intégré à la définition du modèle en horizon fini qui fournira alors des indications sur les actions à entreprendre pour atteindre cette cible dans un laps de temps raisonnable (voir [4, 14] pour plus de détails sur cette approche).

2) Les modèles de PDM peuvent être reformulés comme des programmes linéaires. Cette propriété est essentielle à nos yeux, car il devient alors possible d'ajouter à la formulation du problème de planification des contraintes linéaires de divers ordres, tout en disposant d'une technique de résolution éprouvée.

3) Bien que cela n'ait jamais été fait à notre connaissance dans les modèles existants, on peut dans un modèle de PDM prendre en compte **explicitement** le découpage administratif du réseau étudié par un simple ajout d'indice aux variables de décision. Ceci augmente bien sûr la taille du modèle, mais l'interface avec un modèle de planification tactique s'en trouve grandement simplifié.

Pour toutes ces raisons, nous avons donc décidé de retenir la structure de modèle de processus de décision markovien avec contraintes linéaires supplémentaires pour notre modèle général d'optimisation.

Nous passons maintenant à la description formelle du modèle de PDM spécifique qui constitue le coeur de cette structure. Pour ce faire, nous précisons tout d'abord un certain nombre d'hypothèses concernant le réseau routier considéré :

1) L'horizon de planification (qui peut être infini) est fixé et est divisé en un certain nombre de périodes d'égale longueur (normalement d'une année).

2) Le réseau est divisé en unités administratives de base (que nous appellerons "districts" dans la suite) qui peuvent être regroupées en unités plus grandes (que nous appellerons "régions").

3) Les routes du réseau peuvent être classées en un certain nombre de catégories" (p.e., autoroutes, routes principales et routes secondaires). De plus, à l'intérieur de chaque catégorie, nous supposons qu'il est possible de distinguer, si désiré, plusieurs "types" qui correspondent à des techniques de construction, des matériaux, des niveaux d'achalandage, des environnements climatiques, etc. différents. Nous supposons aussi que le type d'une section ne changera pas à l'intérieur de l'horizon de planification, et que les sections de chacun des types se comportent de manière relativement homogène dans le temps (si besoin

est, on peut définir plusieurs types pour des chaussées présentant des caractéristiques en apparence similaires si leur comportement n'est pas suffisamment homogène).

4) Pour chaque type de chaussées, il est possible de définir un ensemble d'états qui permettent de décrire avec précision leur condition et leur comportement dynamique.

5) Pour chaque état de chaque type, l'ensemble des interventions possibles est clairement défini et non-vide; il existe donc toujours une intervention (qui peut être de "ne rien faire" ou un "entretien de routine") qui peut être exécutée pour chaque état.

6) Ã chaque période l'horizon, on applique exactement une intervention à chaque section de route du réseau. Dans le cas où l'on ne désire pas intervenir sur une section à une période donnée, il faut utiliser une action "ne rien faire" pour cette section. Si l'on désire pouvoir effectuer plusieurs interventions sur une même section durant une période, il faut définir des actions supplémentaires qui correspondent à ces combinaisons d'interventions.

7) Pour chaque type ℓ, chaque paire (e', e) d'états du type ℓ, chaque intervention a permise pour l'état e', la probabilité $p^{\ell a}_{e'e}$ qu'une section de route dans l'état e' au début d'une période soit dans l'état e au début de la période suivante si on lui applique l'intervention a, est connue, stationnaire (indépendante de l'instant considéré) et indépendante du lieu (du district dans lequel la section se trouve). Cette probabilité est appelée **probabilité de transition** et l'ensemble de toutes ces probabilités forme la **matrice de transition** du processus.

Pour simplifier la suite de la présentation, nous introduisons les notations suivantes :

D, l'ensemble des districts;

C, l'ensemble des catégories;

L, l'ensemble des types;

L_c, l'ensemble des types pour la catégorie c, $c \in C$;

E_ℓ, l'ensemble des états pour le type ℓ, $\ell \in L$;

A, l'ensemble des actions ou interventions;

$A_{\ell e}$, l'ensemble des interventions permises pour l'état e du type ℓ, $\ell \in L$, $e \in E_\ell$;

T, la longueur de l'horizon de planification exprimée en périodes;

$b^d_{\ell e}$, le nombre de kilomètres-voies de chaussées du type ℓ dans l'état e situées dans le district d au début de l'horizon de planification (paramètre supposé connu), $d \in D$, $\ell \in L$, $e \in E_\ell$.

Nous allons maintenant énoncer le modèle dans ses deux variantes, à savoir, en horizon fini et en horizon infini. Il est important de souligner qu'il existe plusieurs formulations et plusieurs façons de présenter ce modèle; la présentation que nous avons choisie correspond à une formulation de programmation linéraire qui est en général assez peu usitée par les spécialistes en processus de décision markoviens, mais qui est particulièrement bien adaptée dans notre contexte particulier.

2.1 Modèle en horizon fini

Dans ce modèle, nous voulons déterminer les interventions sur le réseau à chaque instant dans le temps (chaque période) en fonction de l'état des chaussées et par rapport à une agrégation types-districts. Pour

ce faire, il nous faut donc définir des varibles de décision qui sont de la forme $x_{\ell e}^{adt}$ avec $\ell \varepsilon L$, $e \varepsilon E_\ell$, $a \varepsilon A_{\ell e}$, $d \varepsilon D$, $t \varepsilon \{1, \ldots, T\}$, et qui correspondent à "l'espérance mathématique (moyenne) du nombre de kilomètres-voies du type ℓ dans l'état **e** situées dans le district **d** auxquels on applique l'intervention **a** durant la période **t**". Notons au passage que les variables de décision correspondent à des espérances mathématiques plutôt qu'à des nombres exacts parce que le comportement des chaussées est décrit de façon probabiliste.

Pour assurer la cohérence de la description du réseau dans le temps, les variables de décision sont liées par des **contraintes de dynamique du réseau.** Afin de permettre une meilleure compréhension de ces contraintes, nous introduisons des variables auxiliaires de la forme $y_{\ell e}^{dt}$ et qui correspondent à "l'espérance du nombre de kilomètres-voies du type ℓ dans l'état **e** situées dans le district **d** au début de la période **t**" pour chaque combinaison (ℓ, e, d, t).

On peut tout d'abord exprimer le fait que l'on doit appliquer exactement une intervention à chaque section à chaque période de l'horizon (hypothèse 6) en écrivant :

$$\sum_{a \varepsilon A_{\ell e}} x_{\ell e}^{adt} = y_{\ell e}^{dt}, \qquad \forall \ell \varepsilon L, \forall e \varepsilon E_\ell, \forall d \varepsilon D, \forall t \varepsilon \{1, \ldots, T\}. \qquad (1)$$

D'autre part, on sait qu'une section de type ℓ qui est dans l'état e' a une probabilité $p_{e'e}^{\ell a}$ de se retrouver dans l'état e à la période suivante (hypothèse 7). C'est donc dire que, si, à la période t, on applique cette action à $x_{\ell e'}^{adt}$ kilomètres-voies de routes, dans le district d, on devrait en moyenne avoir $(p_{e'e}^{\ell a} \; x_{\ell e'}^{adt})$ de ces kilomètres-voies dans l'état e à la période (t+1). En sommant sur tous les états et toutes les interventions possibles, on obtient :

$$\sum_{e'\in E_\ell} \sum_{a\in A_{\ell e'}} p^{\ell a}_{e'e}\, x^{adt}_{\ell e'} = y^{d(t+1)}_{\ell e}, \quad \forall \ell\in L,\ \forall e\in E_\ell,\ \forall d\in D,\ \forall t\in\{1,\ldots,T\},$$

ce qui peut être réécrit sous la forme :

$$\sum_{e'\in E_\ell} \sum_{a\in A_{\ell e'}} p^{\ell a}_{e'e}\, x^{ad(t-1)}_{\ell e'} = y^{dt}_{\ell e}, \quad \forall \ell\in L,\ \forall e\in E_\ell,\ \forall d\in D,\ \forall t\in\{1,\ldots,T\}. \quad (2)$$

On peut maintenant éliminer les variables auxiliaires $y^{dt}_{\ell e}$ en soustrayant membre à membre les équations (2) des équations (1). On obtient alors les contraintes de dynamique de réseau dans leur forme finale :

$$\sum_{a\in A_{\ell e}} x^{adt}_{\ell e} - \sum_{e'\in E_\ell} \sum_{a\in A_{\ell e'}} p^{\ell a}_{e'e}\, x^{ad(t-1)}_{\ell e'} = 0, \quad \forall \ell\in L,\ \forall e\in E_\ell,\ \forall d\in D,\ \forall t\in\{2,\ldots,T\}. \quad (3)$$

Pour t=1, nous avons $y^{d1}_{\ell e} = b^{d}_{\ell e}$ et nous obtenons donc les contraintes :

$$\sum_{a\in A_{\ell e}} x^{ad1}_{\ell e} = b^{d}_{\ell e}, \quad \forall \ell\in L,\ \forall e\in E_\ell,\ \forall d\in D. \quad (4)$$

Pour une fonction économique linéaire quelconque définie par un ensemble de coefficients $\{f^{adt}_{\ell e}\}$ pour toutes les valeurs de a,d,t,ℓ et e, le modèle en horizon fini consiste donc à optimiser (maximiser ou minimiser selon le cas) l'objectif

$$z = \sum_{t=1}^{T} \sum_{d\in D} \sum_{\ell\in L} \sum_{e\in E_\ell} \sum_{e\in A_{\ell e}} f^{adt}_{\ell e}\, x^{adt}_{\ell e}$$

sous les contraintes de dynamique de réseau (3) et (4) et sous des contraintes de non-négativité sur les variables de décision $x^{adt}_{\ell e}$. On peut donc vérifier que ce modèle correspond bien à un programme linéaire.

2.2 Modèle en horizon infini

Dans ce modèle-ci, nous nous intéressons à la détermination d'une politique d'intervention stationnaire (qui demeure la même de période en période) optimale et au comportement à long-terme du réseau sous cette politique. Si certaines conditions techniques sont vérifiées (nous croyons qu'elles devraient l'être dans presque tous les cas en pratique, et nous renvoyons le lecteur intéressé à [15] pour plus de détails), le réseau dans son ensemble tendra vers un état d'équilibre probabiliste. C'est donc dire que, pour chaque combinaison d'indices de type (ℓ) et de district (d), l'espérance du nombre de kilomètres-voies dans chaque état $e \in E_\ell$ sera constante. D'autre part, puisque la politique optimale est stationnaire, les variables de décision seront indépendantes de la période, ce qui nous permet de réécrire les contraintes de dynamique de réseau à partir de (3) en laissant simplement tomber l'indice de période t. On obtient alors :

$$\sum_{a \in A_{\ell e}} x_{\ell e}^{ad} - \sum_{a \in E_{\ell e}} \sum_{a \in A_{\ell e'}} p_{e'e}^{\ell a} \, x_{\ell e'}^{ad} = 0, \quad \forall \ell \in L, \ \forall e \in E_\ell, \ \forall d \in D. \qquad (5)$$

On peut remarquer que si l'on fait la somme pour une paire d'indices (ℓ,d) de toutes les contraintes (5) (si l'on somme sur tous les états e dans E_ℓ), on obtient après simplification (en exploitant le fait que $\sum_{e \in E_\ell} p_{e'e}^{\ell a} = 1$ pour toutes les combinaisons ℓ, e', a) un membre gauche nul. Ceci nous indique qu'il y a de la redondance parmi ces contraintes et donc qu'il faut éliminer arbitrairement une contrainte pour chaque paire (ℓ, d). Cette contrainte est remplacée par une contrainte de la forme :

$$\sum_{e \in E_\ell} \sum_{a \in A_{\ell e}} x_{\ell e}^{ad} = \sum_{e \in E_\ell} b_{\ell e}^{d}, \qquad \forall \ell \in L, \ \forall d \in D. \qquad (6)$$

Ces contraintes établissent le nombre de kilomètres-voies de chaque type dans chaque district; elles jouent donc un rôle assez semblable à celui des contraintes (4) dans le modèle en horizon fini.

La formulation complète du modèle en horizon infini est semblable à celle du modèle en horizon fini à l'indice t près.

3. LE CADRE DESCRIPTIF FORMEL

La fonction du cadre descriptif formel est de permettre à un planificateur peu familier avec la programmation mathématique de décrire complètement les problèmes qui l'intéressent dans le contexte du modèle général d'optimisation que nous venons de définir.

Il paraît plausible de penser que, dans le cadre d'un exercice de planification, un usager sera amené à formuler une série de problèmes d'optimisation distincts qui présenteront néanmoins un grand nombre d'éléments communs. Ces éléments correspondent à des données relativement statiques dans le cadre de l'exercice de planification : structure administrative et logique (catégories, types, états, interventions) du réseau considéré, paramètres essentiels relatifs à celui-ci (état initial, matrice de transition, coûts des interventions, mesures de performance usuelles, etc.). Les autres éléments descriptifs des problèmes à résoudre peuvent alors être vus comme définissant une série de "scénarios de planification". Cette division conceptuelle nous a amené à concevoir un cadre descriptif formel constitué de deux **langages** qui servent respectivement à la description des réseaux et des scénarios. La description complète d'un problème dans notre cadre requiert donc un **fichier réseau** et un **fichier scénario** écrits respectivement dans le langage de description correspondant.

On pourra remarquer dans la suite que le niveau d'expertise technique (et de familiarité avec les langages) nécessaire à la création des

fichiers réseaux est beaucoup plus élevé que pour la spécification de fichiers scénarios. Il serait donc possible à l'intérieur d'une agence de confier la responsabilité de la création et de la mise à jour des fichiers réseaux à un groupe restreint de "spécialistes", alors que la grande majorité des usagers pourrait se contenter de ne maîtriser que la description de scénarios.

Nous décrivons maintenant brièvement les deux langages en question.

3.1 Le langage de description de réseaux

Le langage de description de réseaux est un langage (informatique) formel qui spécifie la séquence et le format exacts dans lesquels doivent apparaître les divers éléments qui composent un fichier réseau. La structure générale d'un tel fichier est la suivante :

- bloc d'identification : nom du réseau, date, longueur de l'horizon de description;
- bloc géographique : nombre de régions et de districts, liste des numéros (codes) des régions et des districts, liste des districts composant chaque district;
- structure de catégories : liste des noms de catégories;
- structure de types et d'états : pour chaque catégorie, une liste de tous les types avec les états correspondants;
- structure d'actions : liste de toutes les interventions avec leur nom et le sous-ensemble d'états pour lesquels elles sont permises;
- structures de fonctions : une liste de fonctions linéaires définies soit par rapport aux interventions (les variables de décision du modèle), soit par rapport aux état (les variables auxiliaires y du modèle); pour chaque fonction, on indique son nom, son type ("action" ou "état") et la liste de ses coefficients;

- structure d'état initial : une description de l'état du réseau au début de la première période (les paramètres b du modèle);
- structure de matrice de transition : une liste des probabilités de transition pour toutes les interventions et tous les états (les paramètres p du modèle).

À la lecture de cette énumération, il devrait être clair que la constitution d'un fichier réseau représente une tâche substantielle. Afin de l'alléger quelque peu, nous avons introduit dans la syntaxe du langage des règles qui permettent l'utilisation de notations compactes (p.e. pour définir des groupes de coefficients identiques dans les fonctions) chaque fois que cela était possible.

3.2 Le langage de description de scénarios

De manière semblable à ce que l'on a pour la description de réseaux, le langage de description de scénarios est un langage (informatique) formel qui décrit la structure et le format des fichiers scénarios.

Pour un réseau donné, la description d'un scénario peut être ramenée à la spécification de l'horizon de planification (qui peut être infini), de la fonction économique, des contraintes additionnelles que l'usager désire imposer et éventuellement d'un état-cible pour le réseau à la fin de l'horizon de planification. Le planificateur n'a pas à se préoccuper des contraintes de dynamique du réseau qui sont toujours implicitement présentes (dans la forme du modèle en horizon fini ou de celui en horizon infini selon la spécification de l'usager).

La structure des fichiers scénarios est donc relativement simple : on y retrouve d'abord un énoncé qui indique le nom du réseau auquel se rapporte le scénario, un énoncé de spécification de l'horizon et un énoncé

de déclaration de la fonction économique (l'objectif); ceux-ci sont suivis d'un bloc d'énoncés pour les contraintes de l'usager et, le cas échéant, d'un autre bloc pour la spécification de l'état-cible.

L'objectif et les contraintes de l'usager sont décrits en utilisant les fonctions définies dans le fichier réseau correspondant.

L'aspect le plus intéressant du langage est la syntaxe de l'énoncé **CONTRAINTE.** Celle-ci permet en effet au planificateur de spécifier en un seul énoncé toute une famille de contraintes semblables de façon simple et naturelle. Il serait relativement long et fastidieux de vouloir expliquer en détail cette syntaxe et l'interprétation qui en est faite. Nous avons donc plutôt préféré présenter dans la section qui suit quelques exemples représentatifs de celle-ci.

4. EXEMPLES

Considérons un réseau routier (appelé EXEMPLE) divisé en dix districts (numérotés de 1 à 10) regroupés arbitrairement en trois régions (numérotées de 1 à 3) et comportant trois catégories de routes (autoroutes, principales et secondaires). Il existe deux types d'autoroutes, le type 1 qui correspond à celles dont la chaussée est rigide, et le type 2 pour celles à chaussée souple, et un seul type dans chaque cas pour les routes principales et les routes secondaires. Il existe au total une dizaine d'interventions possibles, et trois interventions en moyenne sont permises pour chacun des états. Pour ce réseau, les quatre fonctions suivantes on été définies dans le fichier réseau :

- COÛT qui donne pour chaque intervention le coût moyen par kilomètre-voie en fonction de la catégorie, du type et de l'état;
- INACCEPT qui est une fonction 0-1 indiquant pour chaque état (de chaque type de chaque catégorie) si celui-ci est jugé inacceptable pour fins de planification;

- ROULEMENT qui donne sur une échelle 0-100 la cote moyenne de roulement associée à chaque état;
- KILOM qui est une fonction "bidon" valant 1 pour toutes les interventions et tous les états.

Scénario 1

On désire minimiser le coût total du programme d'entretien et de réhabilitation sur un horizon de cinq périodes sans autres contraintes. Pour ce faire, un fichier scénario de trois énoncés est suffisant :

(1.1) RÉSEAU EXEMPLE
(1.2) HORIZON 5
(1.3) OBJECTIF MINIMISER COÛT.

La formulation complète de ce scénario nécessite cependant 1 000 contraintes de dynamique de réseau (une contrainte par combinaison période-district-état : 5 x 10 x (6 + 5 + 5 + 4)) et environ 3 000 variables de décision, puisqu'il y a en moyenne 3 interventions permises pour chaque état.

Scénario 2

On désire maximiser à long terme la cote de roulement moyenne du réseau en limitant les dépenses d'entretien et de réhabilitation par période à 5 000 000 $. Ici, on a affaire à une formulation en horizon infini et la maximisation de la cote de roulement moyenne est équivalente à celle de la cote totale. Le problème peut donc s'écrire sous la forme :

(2.1) RÉSEAU EXEMPLE
(2.2) HORIZON 0 (le symbole "0" représente l'infini)
(2.3) OBJECTIF MAXIMISER ROULEMENT
(2.4) CONTRAINTE COÛT < 5 000 000.

Dans ce scénario-ci, la formulation comporte seulement 200 contraintes de dynamique de réseau (qui sont maintenant de la forme des équations (5) et (6)), 600 variables et une contrainte unique sur les coûts du programme.

Scénario 3

À l'opposé des scénarios précédents qui sont très simples, un planificateur peut spécifier un jeu de contraintes extrêmement complexe. Considérons, par exemple, ce scénario :

(3.1) RÉSEAU EXEMPLE
(3.2) HORIZON 5
(3.3) OBJECTIF MINIMISER INACCEPT
(3.4) CONTRAINTE COÛT PÉRIODE * < 2 000 000
(3.5) CONTRAINTE COÛT DISTRICT * > 500 000
(3.6) CONTRAINTE MOYENNE ROULEMENT PRINCIPALES > 75
(3.7) CONTRAINTE MOYENNE ROULEMENT AUTOROUTES TYPE 1 PÉRIODE * > 85
(3.8) CONTRAINTE KILOM RAPIÉÇAGE PÉRIODE 1,2 < 500
(3.9) CONTRAINTE MOYENNE INACCEPT TYPE * RÉGION * PÉRIODE * < 0,1.

Ce scénario ressemble a priori énormément au scénario 1 puisque l'on désire optimiser le programme d'entretien et de réhabilitation pour le réseau EXEMPLE sur un horizon de 5 périodes. On retrouvera donc dans la formulation 1 000 contraintes de dynamique de réseau et environ 3 000 variables de décision. Ce scénario diffère cependant du précédent par le fait que l'objectif à atteindre est la minimisation du nombre de kiomètres-voies de routes jugées inacceptables sur l'ensemble du réseau sur l'horizon de planification, et par les nombreuses contraintes additionnelles qui sont imposées.

Pour mieux comprendre ces contraintes, il faut préciser que, dans les énoncés CONTRAINTE, chaque terme décrivant un ensemble de catégories,

de subdivisions administratives ou de périodes (par exemple, 'PÉRIODE 1,2' dans l'énoncé 3.8) nous indique qu'il y a une contrainte distincte de cette forme pour chaque élément de cet ensemble, et que, dans ce contexte, le symbole '*' représente toute la plage possible d'indices (par exemple, le terme 'PÉRIODE *' est équivalent ici au terme 'PÉRIODE 1-5'). D'autre part, le mot-clé 'MOYENNE' permet de créer des contraintes sur la valeur moyenne que prend une fonction donnée sur un sous-ensemble des variables de décision, plutôt que sur sa valeur totale.

Pour ce scénario, les contraintes additionnelles sont donc les suivantes :

1) L'énoncé (3.4) correspond à une contrainte de budget de 2 000 000 $ pour l'ensemble réseau à chacune des périodes (5 contraintes en tout).

2) L'énoncé (3.5) impose une borne inférieure de 500 000 $ aux dépenses d'entretien pour tout l'horizon de planification dans chacun des districts (10 contraintes).

3) L'énoncé (3.6) est une contrainte globale sur la cote moyenne de roulement des routes principales de tout le réseau sur l'ensemble de l'horizon (une seule contrainte).

4) Dans l'énoncé (3.7), on exige que la cote moyenne de roulement des autoroutes à chaussée rigide (TYPE 1) ne soit pas inférieure à 85 durant chacune des périodes (5 contraintes).

5) L'énoncé (3.8) correspond à une politique de limitation des interventions de rapiéçage à 500 km-voies par période pour les deux premières périodes (2 contraintes).

6) Dans l'énoncé (3.9), on demande que la proportion de routes dans un état inacceptable ne dépasse pas 0,1 (10%) pour chacune des combinaisons type-région-période (au total, 60 contraintes).

5. IMPLANTATION INFORMATIQUE

Dans le cadre de l'approche que nous proposons, la résolution d'un problème de planification stratégique spécifique comporte les étapes suivantes :

1) saisie du problème dans sa représentation-usager (constitution de fichiers réseau et scénario);

2) passage de la représentation-usager à une représentation mathématique du problème dans un format approprié;

3) résolution du problème d'optimisation mathématique;

4) présentation des résultats de la procédure d'optimisation dans une forme compréhensible pour le planificateur.

Nous avons amorcé durant l'été 1988 le développement d'un système-prototype basé sur notre méthodologie. Compte tenu du fait que le problème d'optimisation est formulé comme un programme linéaire, et considérant l'efficacité et le faible coût de certains logiciels commerciaux de programmation linéaire, il nous paru plus judicieux dans ce prototype d'utiliser pour l'étape de résolution proprement dite l'un de ces logiciels : XMP de R.E. Marsten [7]. Il nous a alors fallu mettre au point un programme qui construit un fichier d'entrée pour XMP à partir d'un fichier réseau et d'un fichier scénario, ces deux derniers fichiers étant pour le moment constitués manuellement à l'aide d'un éditeur de fichiers standard. Nous avons aussi complété un programme de validation qui permet de vérifier si un fichier scénario respecte bien les règles du langage de description de scénarios et d'indiquer, le cas échéant, les énoncés erronés, ainsi qu'une procédure simple pour la présentation des résultats produits par XMP.

Dans le futur, nous comptons compléter ce prototype en y ajoutant des programmes interactifs pour la constitution de fichiers réseaux et scénarios et un ensemble de procédures beaucoup plus puissantes pour la présentation des résultats sous diverses formes (tableaux, courbes, graphiques, etc.).

CONCLUSION

Nous avons proposé une nouvelle approche pour la planification de l'entretien et de la réhabilitation des réseaux routiers. Cette approche, tout en se situant dans le prolongement de pratiques et de modèles bien établis dans le domaine, privilégie le rôle du planificateur dans la formulation précise du modèle mathématique de planification qui retrouve alors sa fonction propre d'outil d'aide à la décision. Nous espérons ainsi contribuer au développement de techniques de planification plus efficaces dans le domaine de la gestion des chaussées et, en conséquence, à une utilisation plus rationnelle des ressources consacrées à la conservation des infrastructures routières.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été rendue possible grâce à une subvention **F.C.A.R.-Action concertée sur l'entretien et la réhabilitation du réseau routier du Québec** et au support du **Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada.**

RÉFÉRENCES

1. AHMED, N.V., LU, D.Y., MAHONEY, J.P., PHILLIPS, D.T. et LYTTON, R.L., "The Texas Rehabilitation and Maintenance District Optimization System", Texas Transportation Institute Research Report 207-3, Texas A&M University, 1978.

2. GENDREAU, M., "A Decomposition Approach for Rehabilitation and Maintenance Programming", Proceedings of the Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, 2-6 novembre 1987, vol. 2, pp. 2.207-2.217.

3. KHER, R. et COOK, W.D., "PARS: The MTC Model for Program and Financial Planning in Pavement Rehabilitation", Proceedings of the North American Pavement Management Conference, Toronto, 18-21 mars 1985, vol. 2, pp. 6.23-6.40.

4. KULKARNI, R., GOLABI, K. et WAY, G.B., "A Statewide Pavement Management System", Interfaces, vol. 12, no 6, pp. 5-21, 1982.

5. LYTTON, R.L., "Session 6: Optimization Methodologies-Introduction", Proceedings of the North American Pavement Conference, vol. 2, Toronto, 18-21 mars 1985, p. 6.3.

6. "Managing Pavements Around the World", Proceedings of the Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto 2-6 novembre 1987, vol. 1, pp. 1.275-1.426.

7. MARSTEN, R.E., "The Design of the XMP Linear Programming Library", Transactions on Mathematical Software, vol. 7, 1981.

8. NESBITT, D.M. et SPARKS, G.A., "A Computationally Efficient System for Infrastructure Management with Application to Pavement Management", Proceedings of the Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, 2-6 novembre 1987, vol. 2, pp. 2.219-2.239.

9. PATERSON, W.D.O. et FOSSBERG, P.E., "Achieving Efficiency in Planning and Programming through Network-level Policy Optimization and Pavement Management", Proceedings of the Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, 2-6 novembre 1987, vol. 2, pp. 2.183-2.194.

10. PETERSON, D.E., "Comparative Analysis of Several State and Provincial Systems for Managing Pavements", Proceedings of the Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, 2-6 novembre 1987, vol. 1, pp. 1.15-1.26.

11. SKLUTE, S., DESAI, H.R. et GRIMSLEY, C.F., "Resurfacing Program Consequence Analysis and Funding Allocations", Proceedings of the North American Pavement Management Conference, Toronto, 18-21 mars 1985, vol. 2, pp. 5.5-5.16.

12. THOMPSON, P.D., NEUMANN, L.A., MIETTINEN, M. et TALVITIE, A., "A Microcomputer Markov Dynamic Programming System for Pavement Management in Finland", Proceedings of the Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, 2-6 novembre 1987, vol. 2, pp. 2.241-2.252.

13. ULLDITZ, P., "A Danish Pavement Management System", Proceedings of the North American Pavement Management Conference, Toronto, 18-21 mars 1985, vol. 2, pp. 6.84-6.95.

14. WAY, G.B., "Network Optimization System for Arizona", Proceedings of the North American Pavement Management Conference, Toronto, 18-21 mars 1985, vol. 2, pp. 6.16-6.22.

15. WHITE, C.C. et WHITE, D.J., "Markov Decision Processes", European Journal of Operational Research, vol. 39, pp. 1-16, 1989.